

Variación microestructural del acero AISI 1045 endurecido por rodadura

Tomás Fernández Columbié
Isnel Rodríguez González
Dayanis Alcántara Borges
Esther Fernández Guilarte

Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento microestructural del acero AISI 1045, endurecido mediante deformación plástica superficial por rodillo, empleando como variables en el proceso de endurecimiento el número de revoluciones, avance y fuerza del torno 16D20. Se empleó el análisis espectral para determinar la composición química del acero y el Nital como reactivo químico para resaltar la estructura metalográfica después de pulida. Se establecen los parámetros de los regímenes de la deformación plástica superficial por rodillo para evaluar la dureza de los pasadores utilizados en las esteras de los equipos de laboreo minero y se expone una metodología para determinar el tiempo de ejecución del corte de las muestras.

Palabras clave

Acero AISI 1045, acritud, deformación plástica, endurecimiento superficial, microestructura, rodadura.

Hardened AISI 1045 steel micro-structural variation due to rolling

Abstract

This work presents the micro-structural behaviour of AISI 1045 steel, hardened by plastic deformation using a roller, showing the impact of the variables applied in the hardening procedure; such as: number of revolutions, advance and power. An spectral analysis was carried out, by which the chemical composition of the steel was identified and the procedures for the preparation of test tubes were defined, as well as the chemical reagent used to highlight the metallographic structure after polishing. Parameters were defined for determining the rates of superficial plastic deformation using a roller; causing the hardness of pins to increase; as well as the methodology for determining cutting time

Key words

AISI 1045 Steel, acrimony, plastic deformation, superficial hardening, micro-structures, rolling.

INTRODUCCIÓN

El acero AISI 1045, con el que se fabrican los pasadores de las esteras de los equipos de laboreo minero, se endurece producto del efecto de la deformación plástica originada por la fricción o interacción del par tribológico (pasador-casquillo) durante el movimiento de las esteras. Tal efecto se produce simultáneamente al desgaste de los pasadores, lo que provoca que las esteras sean retiradas del servicio.

El proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple es un método alternativo ventajoso respecto a los esquemas tecnológicos tradicionales empleados para aumentar la calidad de las superficies de piezas metálicas, y reporta una mayor eficiencia técnico económica y menor contaminación al medio ambiente. Ha sido empleada con gran eficacia en metales no ferrosos. Sin embargo, la literatura especializada no reporta resultados acerca del comportamiento microestructural del acero AISI 1045 sometido a deformación plástica superficial por rodillo simple, por lo cual el objetivo de este trabajo es establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 sometido al proceso de deformación plástica superficial en frío, empleando un rodillo como elemento deformante.

Niberk (1987) y Smelyanky *et al.* (2001) consideran que la deformación plástica ocurre por el movimiento de las dislocaciones, que no es más que un proceso de desplazamiento de una parte del cristal con respecto a otra. Dentro del cristal, un par de dislocaciones en movimiento genera centenares de nuevas dislocaciones y como resultado de esto la densidad de las dislocaciones aumenta, lo que ocasiona el endurecimiento. Además se producen importantes variaciones en la estructura del acero, como es la deformación de la red cristalina y la reorientación de los granos en la dirección de la deformación; el acero pasa de forma equiaxial a tener ejes desiguales (alargados y aplastados).

De la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta del movimiento de dislocaciones bajo la acción de la tensión aplicada (Lubliner 1986,

Badiola 2004). Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Las dislocaciones se crean en un campo de red cúbica deformada. La energía de la red cristalina se caracteriza por el llamado vector de Burgers.

La magnitud de la deformación plástica depende de la restricción a que es sometido el material deformado (granos con acritud) por el metal que lo rodea y que permanece en estado elástico (granos indicadores). El nivel de tensionamiento del metal que no ha sido deformado lo caracterizan las tensiones residuales de primer género (Barret 1957, Cullity 1967). Es por ello que la magnitud de las tensiones residuales, después de la deformación plástica, es un indicador del estado tensional de la pieza durante la primera etapa de la destrucción, denominada "período de iniciación de la grieta" (Key to Steel 2002).

Las tensiones ejercidas sobre la zona de la superficie de la pieza durante el rodillado, conducen a una modificación sostenida del estado de tensión residual. Por muy complejo que resulte el proceso de la deformación plástica, siempre puede descomponerse en un conjunto de subprocesos u operaciones elementales que, analizadas aisladamente, pueden desarrollarse como un proceso complejo.

Los procesos deformacionales que tienen lugar en las microirregularidades de las superficies en contacto están en dependencia de las presiones que se originen en las áreas reales de contacto. Si el valor de estas presiones no alcanza el límite de fluencia del material más blando, las deformaciones que predominan son elásticas y el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga superficial. El desgaste por deslizamiento tiene una gran relevancia sobre el mecanismo de desgaste por fatiga, pues un aumento en el porcentaje de deslizamiento/rodadura puede causar una mayor pérdida de masa de las superficies en contacto (Bhushan 2001).

El AISI 1045 (Díaz 2005) logra unificar las propiedades de resistencia al desgaste y de acabado superficial, en consecuencia constituye el

material idóneo para la fabricación de los pasadores, atendiendo a que es apropiado para el conformado y a que su costo de producción es relativamente bajo; sin embargo, la dureza original del acero suministrado por los laminadores no es adecuada para su uso en pasadores, por lo que debe ser previamente sometido a un proceso de endurecimiento, el cual tradicionalmente se realiza mediante tratamiento térmico. Este trabajo propone una alternativa al proceso de endurecimiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica superficial por rodillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Composición química del acero

El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Análisis microscópico

Para el análisis bajo microscopio, las probetas fueron preparadas siguiendo las normas NC 10 - 56:86 y ASTM E3 - 95. El corte se realizó según norma ASTM E 3 - 95, se empleó cuchilla Sandvik, código del vástago CNGA R 25 25 M 12, con una placa T - MAX - CUT 12 04 12 de calidad T 025 20 (SANDVIK Coromant KoroKey 1996).

Desbaste y pulido

Se realizó con el empleo de la máquina pulidora y papeles abrasivos No. 180, 400 y 600 (ISO 9001), variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, montando la lija sobre una placa de vidrio y cambiando el sentido del lijado 90°; por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica, para lograr el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Ataque químico

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido, para observar la estructura metalográfica formada después de la deformación del material bajo carga por

rodadura (según ASTM E - 262 - Practice A). Para el ataque químico se utilizó Nital al 4 %.

Análisis microestructural

Para la observación de la microestructura se empleó un microscopio óptico binocular NOVEL modelo NIM - 100 dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. La observación se realizó empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular, obteniéndose las imágenes de cada muestra. Las probetas se montaron, con plastilina, en un dispositivo que permitió la nivelación adecuada de estas.

Análisis metalográfico

Fueron observadas probetas (muestras patrones) sin deformar en el centro y con deformación en los bordes después de aplicada la fuerza, se comenzó el proceso con el nivel mínimo, en el cual el valor de la fuerza fue 500 N; el número de revoluciones 27 rev/min y el avance de 0,25 mm/rev.

Metodología para la deformación plástica superficial por rodillo

La magnitud del endurecimiento por deformación en frío y el nivel de las tensiones remanentes en la capa superficial de un cuerpo en revolución, expuesto a rodadura, dependen de la fuerza (P), del número de revoluciones (n), del avance (S), de la geometría de la herramienta y la pieza, y de las propiedades iniciales del material en tratamiento (HB). Los parámetros del proceso de la deformación plástica superficial deben corresponderse con la siguiente condición (Korotcische 1989):

$$\sigma_{pr} < \sigma_B$$

Donde:

σ_B - Límite de resistencia del material antes del endurecimiento; MPa.

σ_{pr} - Tensiones en la zona de contacto de la pieza con la herramienta de deformar, MPa.

Magnitud de las variables empleadas en el proceso

Las variables estudiadas fueron la fuerza (P), el número de revoluciones (n) y el avance (S). La fuerza ejercida por la herramienta deformante (P) es una variable cuantitativa, directamente proporcional a las variables (n) y (S). Se aplicaron cargas de 500, 1 500 y 2 500 N.

El número de revoluciones del husillo (n) es también una variable cuantitativa, que tomó los valores de 27; 54 y 110 rev/min. El avance de la herramienta (S) es la variable que define el comportamiento de la capa deformada. Los valores fijados para ella fueron de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev.

La fuerza de compresión actúa sobre toda la zona de contacto, de forma distribuida, y uniformemente a lo largo del sector. En la Figura 1 se observa la ubicación de los radios de la pieza y el rodillo utilizados para la deformación plástica superficial.

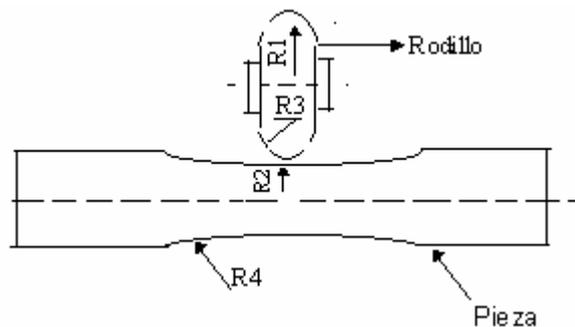


Figura 1. Radios de curvaturas del rodillo y de la pieza.

La fuerza de compresión durante el trabajo con rodillos se determinó por las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_{pr} = a^3 \sqrt{\frac{PpE}{R_2^2}} \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{2R_2} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} \quad (2)$$

Donde:

P_p - Esfuerzo en el rodillo; N.

R_2 - Radio de la superficie de endurecimiento de la pieza; mm.

$R_1; R_3$.- Radios de la sección de trabajo del rodillo, mm.

R_4 .- Radio de la pieza después de la deformación; mm

Variando la carga de la herramienta deformante puede cambiarse la magnitud y el carácter de la distribución de las tensiones creadas en la zona de contacto, y de este modo influir sobre el efecto de endurecimiento, el nivel y el carácter de distribución de las tensiones remanentes. La fuerza a aplicar sobre la pieza a deformar se determina por la ecuación.

$$P_p = 12,5\sigma_T \left(\frac{d_{eje}}{100} \right)^2 \quad (3)$$

Siendo:

σ_T .- Máxima tensión del material a la tracción; N/mm².

d_{eje} .- Diámetro del eje (probeta); mm.

La fuerza de deformación P_p está formada por tres componentes: axial (P_x), radial (P_y) y tangencial (P_z); las fuerzas P_x , P_z , por su magnitud, son mucho menores que P_y , por lo que se establece $P \approx P_y$ para evitar el resbalamiento del rodillo provocado por la fuerza P_x , es conveniente situar el rodillo bajo un ángulo $\beta = 4 - 10^\circ$ hacia el eje de la pieza en tratamiento.

En dependencia del esfuerzo y de la resistencia del material, la profundidad del endurecimiento ante el tratamiento por rodillo se determina por:

$$h = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (4)$$

Donde:

h - profundidad de la capa endurecida; mm.

P - fuerza ejercida por la herramienta; N.

Con el aumento del coeficiente de la fricción externa y de la superficie de contacto del rodillo con la superficie de tratamiento, aumentan las irregularidades de la deformación plástica, y como consecuencia, el nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión.

Las tensiones surgen durante la compresión mutua de dos cuerpos en contacto bajo la acción de una fuerza externa, estando el material en un estado tensional volumétrico, al no poderse deformar libremente en esta zona. Las tensiones de contacto tienen un carácter puramente local y disminuyen consecuentemente a medida que se alejan de la zona. El área real de tensiones máximas de contacto para la superficie de cuerpos curvos, cuando se encuentran en contacto, se determina a partir de la fórmula de Hertz, siempre que el estado tensional sea volumétrico. La expresión para determinar la magnitud del área de la deformación con rodillos (Álvarez 1989) es:

$$\sigma_{maz} = 0,245 \cdot n_p \cdot \sqrt[3]{Fn \cdot E^2 \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right)^2} \quad (5)$$

Donde: σ_{maz} - Tensión máxima en el área de contacto; MPa.

Fn - Fuerza sobre la zona de contacto; N.

$R1, R3$ - Radios de curvatura del rodillo; mm

$R2, R4$ - Radios de curvatura de la pieza; mm

E - Módulo de elasticidad de la pieza; MPa.

n_p - Coeficiente de seguridad de pandeo que depende de la relación:

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1}$$

Teniendo en cuenta el carácter de la deformación, las características operacionales y las condiciones de carga establecidas como fundamento, se valoró el comportamiento de las tensiones locales, las cuales aparecen en los lugares de transmisión de la presión de un cuerpo a otro, formándose un área de contacto que se considera el área reducida para las deformaciones por fluencia. La ecuación (6) relaciona los esfuerzos y las deformaciones con el radio para la mayor carga de trabajo.

$$r = 2,15 \cdot \sqrt{\frac{P}{E} \left(\frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right)} \quad (6)$$

Siendo:

r- radio del área del contacto circular; mm².

La probeta se cortó con una longitud de 10 mm al aire, con abundante refrigeración para lograr una superficie con el mejor acabado superficial posible. Se emplearon los siguientes datos de corte (Casillas 1987):

Frecuencia de rotación del husillo, n = 250 rev/min;

Avance = 0,05 mm/rev

Velocidad de corte Vc, en m/min:

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (7)$$

Donde :

D- Diámetro de la pieza a elaborar; mm

n- Número de revoluciones, rev/min

La profundidad de corte se determina entonces como:

$$t = \frac{D}{2} \quad (8)$$

Siendo t- Profundidad de corte; mm

El tiempo de maquinado empleado en el corte de la probeta se obtuvo según:

$$Tm = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (9)$$

Donde:

L- Longitud de la pieza a maquinar; mm

s- avance; mm/rev.

RESULTADOS

Composición química del acero

La composición obtenida (Tabla 1) se corresponde con la del acero AISI 1045 del sistema de numeración UNS, de la ASTM y la SAE.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1045

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,45	0,25	0,65	0,40	0,10	0,40

Microestructura

La Figura 2 corresponde a la muestra patrón, obtenida del centro del acero AISI 1045 sin deformar, mientras que las Figuras 3, 4 y 5 muestran la microestructura del acero una vez deformado.

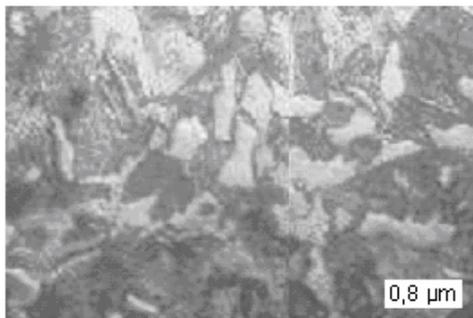


Figura 2. Probeta patrón.

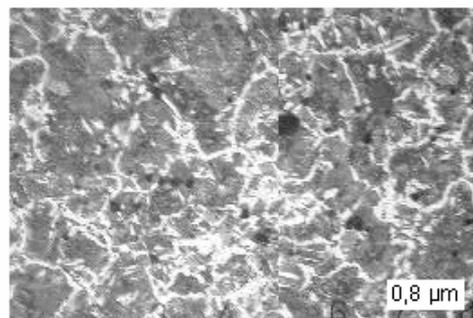


Figura 3. Deformación para 500 N.

La Figura 3 muestra la deformación de la red cristalina del material con el alargamiento de los granos al iniciar el proceso de deformación plástica. Esto está motivado por la introducción de tensiones en el material, que al ser sometido al proceso de compresión compacta los granos grandes dándole mayor dureza al acero.

La figura 4 corresponde a una deformación con fuerza de 1 500 N; 54 rev/min y un avance de 0,125 mm/rev. Se observa mayor agrupación de los granos en la red cristalina producto del deslizamiento. La reducción en el tamaño del grano ocurre por el proceso de la dislocación, las cuales forman barreras que frenan el desplazamiento de las dislocaciones, proceso por el cual endurece el material durante la deformación plástica en frío; esto se debe a que el desorden atómico existente en el borde de grano trae como resultado una

discontinuidad de los planos de deslizamiento de un grano a otro. La reducción del tamaño del grano ferrítico lo hace más duro y más resistente debido a que aumenta el área total de fronteras de grano que impiden el movimiento de las dislocaciones.



Figura 2. Muestra patrón



Figura 4. Deformación para 1500 N

En la figura 5 se observa la estructura deformada con la aplicación de fuerza de 2 500 N, 110 rev/min y avance de 0, 075 mm/rev. Los parámetros aplicados en la obtención de esta microestructura se corresponden con el máximo nivel evaluado, bajo estas condiciones se observa la mayor compactación de los granos, debido al incremento de las variables n , S y P .



Figura 2. Muestra patrón.

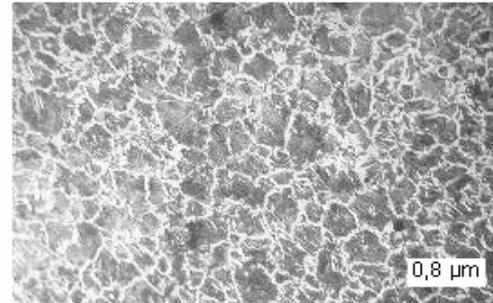


Figura 5. Deformación para 2 500 N.

En las probetas sometidas a deformación se observó una estructura bifásica de ferrita-perlita, lo que demuestra que el endurecimiento por rodadura del acero AISI 1045 ocurre por el fenómeno de la acritud, donde no ocurren cambios de fase. Los límites de los granos se hacen más finos en la medida que se incrementa la fuerza a través de la herramienta deformante.

Después de sometidas a la acción de cargas por rodadura, en la probeta se evidenciaron vestigios de deformación plástica, con

bloques de la estructura en mosaico, divididos en pequeñas porciones, y una deformación clara de la red cristalina, típico del fenómeno de la acritud.

Esto confirma que el proceso de deformación plástica por rodadura en frío ofrece al acero AISI 1045 mayor dureza, al producirse cambios en su estructura metalográfica, ya que los granos, al estar sometidos a tensiones de compresión, se apilan formando una estructura de granos más finos.

La capacidad de endurecimiento (H) tiene un comportamiento creciente en la misma medida que se incrementan las variables n , S , y P . Al aumentar las tensiones de compresión surge un estado tensional que deforma el acero incrementando su dureza final y mejorando así su comportamiento.

CONCLUSIONES

El acero AISI 1045 deformado presenta una estructura ferrítica-perlítica antes y después del tratamiento de deformación plástica superficial con rodadura. No se detectó la aparición de nuevas fases por compresión dinámica.

El aumento de la acritud del acero AISI 1045 a través del mecanismo de deformación plástica por rodadura se produce como consecuencia del tensionamiento de la red cristalina del acero y la reducción del tamaño promedio de los granos.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, L. & GONZÁLEZ, J. 1989: Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. *Construcción de maquinaria 2*: 69-76.
- BADIOLA, V. 2004: Materiales. En: *Diseño de Máquinas I* Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, España, 60 p.
- BARRET, C. 1957: *Estructura de los metales*. Editorial Aguilar, Madrid, 838 p.
- BHUSHAN, B. & GUPTA, B. K. 2001: *Handbook of tribology*, McGraw-Hill, New York.
- CASILLAS, A. 1987: *Cálculo de Taller*. 5^{ta} ed, Madrid, 316 p.

- CULLITY, B. D. 1967: Elements of X – Ray Diffraction Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias, La Habana, 514 p.
- DÍAZ, S. & ROBERT, T. 2005: Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045. *Revista Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo* 2 (7) Año 4, Septiembre :32-40.
- KEY TO STEEL. 2002: Fracture Toughness Key to Steel Web Site 2002. Consulta: 28 dic 2008. Disponible en: <http://www.key-to-steel.com/>
- Korotcishe, L. 1989: *Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura*. Editorial Mir, Moscú, 60 p. (en ruso).
- LUBRINER, J. 1986: *Plasticity Theory*. University of California at Berkeley. Charter 2. McGraw-Hill, New York. P. 77 - 86.
- NIBERK, A. N. 1987: Resistencia al desgaste de guías tratadas por rodillado. *Stanki instrument* 5 : 25 - 26.
- SANDVIK, COROMANT KOROKEY. 1996: Cuchillas de corte. En: *Guía de aplicación de herramientas*. SANDVIK Coromant Korokey, p. 38 - 43.
- SMELYANKY, V. M. & BLUMENSTEIN, V. YU. 2001: Technological succession mechanics succession appropriatenesses of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation. Proceeding of International Conference of Materials, May 2001, Russia.

Tomás Fernández Columbié

MSc. En Manufactura y Mecatrónica. Profesor Asistente.
Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero
Metalúrgico de Moa.

tfernandez@ismm.edu.cu

Isnel Rodríguez González

MSc. En Electromecánica. Profesor Auxiliar. Departamento de
Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

irgonzalez@ismm.edu.cu

Dayanis Alcántara Borges

Ingeniera Mecánica. Profesora Instructora. Departamento de
Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

dalcantara@ismm.edu.cu

Esther Fernández Guilarte

Auxiliar Técnico Docente. Departamento de Mecánica. Instituto
Superior Minero Metalúrgico de Moa.

efguilarte@ismm.edu.cu